

## 組合せ応力下における冷間加工用工具鋼の強度とじん性の評価

後藤 善弘\* 赤坂 恵造\*\* 土肥 祐三\*\*\*

### Assessment of Strength and Toughness of Alloyed Tool Steel for Cold Metal Forming under Combined Stress

Yoshihiro GOTO\*, Keizo AKASAKA\*\* and Yuzo DOHI\*\*\*

(Received February 29, 1992)

To assess the strength and the toughness of an alloyed tool steel (JIS SKD11) for cold metal forming, quasi-static combined stress tests under tensile and torsional stresses are carried out by using the hollow specimens varied with the hardness. As the measures of the strength and the toughness, the equivalent yield stress and the absorptive energy estimated by the equivalent stress-strain relation are used respectively.

From the relations between the absorptive energy and the hardness of the tool steels, three kinds of regions which correspond to the ductile fracture, brittle fracture and transition were clearly recognized.

By introducing anisotropic parameter  $\bar{r}$  value for the anisotropic yield function proposed by R. Hill, the relations between tensile yield stress and torsional yield stress, that is, the yield curves are a fairly good approximation.

The hardness and optimum condition of heat treatment in the case of which the alloyed tool steel, SKD11 is used practically are also discussed.

#### 1. 緒 言

塑性加工における製品品質や生産性にとって金型の強度やじん性は重要な因子となっている。特に、ステンレス鋼、チタン合金など難加工性材料が被加工材として採用される今日では、工具への負荷はより高応力化、かつ複雑化しておりその影響はより大きなものとなっている。また、加工技術の面でも製品の多様化やそれに伴う生産量の少量化に対応して、素形材の高精度化、複雑異形状の加工が工具の性能の要求に拍車をかけている。

現在までに塑性加工用工具材料に関する研究報告は熱処理条件や耐摩耗性に関するものが多い。また、強度に関する研究は、単軸応力下での引張り、圧縮、疲労強度、あるいは衝撃試験などに関するもの<sup>1)</sup>が公表されている。しかし、実際の負荷状態に近い組合せ応力下における強度や降伏曲面についての報告は極めて少ないのが現状である。

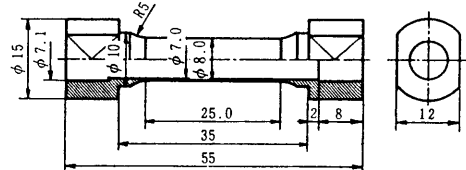
本報では、冷間ダイス鋼(SKD11)に静的引張りおよびねじりモーメントを同時に負荷し得る組合せ応力試験を行い、その強度とじん性を降伏応力と吸収エネルギーで評価した結果を報告する。また降伏曲面から $\bar{\sigma}$ 値を力学的に算出し、その強度、じん性および破壊様式におよぼす影響について検討した結果を報告する。

## 2. 実験方法および実験条件

### 2・1 実験材料および熱処理

試験片材料には冷間ダイス鋼SKD11を用いた。試験片の形状は図1に示すような中空および中空試験片であり、標点間はい内面、外面とも800番のエメリ紙で研磨を施してある。また、熱処理は表1、表2に示した条件で焼入れ、焼もどしを行いHV500~800の6種類のかたさの試験片を用意した。

(a) Hollow specimen



(b) Solid specimen

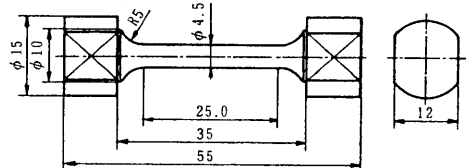


表1 試験片の焼入れ条件

Furnace atmosphere	Vacuum heat treatment $1 \times 10^{-2}$ Torr
Pre-heating	650°C × 60min
High heat	1025°C × 30min
Cooling	Pressure nitriding ( $2 \text{ kg/cm}^2$ )

図1 試験片の形状

表2 試験片の焼きもどし条件

Vickers hardness (HV)	Furnace atmosphere	Temperature and hold time		Cooling
		First	Second	
500	Nitrogen	530°C × 2hr	600°C × 2hr	Nitrogen cooling (1 atm)
590	Nitrogen	530°C × 2hr	570°C × 2hr	Nitrogen cooling (1 atm)
630	Vacuum	535°C × 2hr	545°C × 2hr	Nitrogen cooling (1 atm)
720	Vacuum	210°C × 2hr	210°C × 2hr	Slow cooling
760	Vacuum	185°C × 2hr	185°C × 2hr	Slow cooling
820	Vacuum	150°C × 2hr	—	Slow cooling

### 2・2 実験装置

本実験で使用した引張り—ねじり組合せ応力試験装置の概略を図2に示す。基本構成は、材料試験機に試作したトルク負荷装置を組合せたものであり、試験片に引張り荷重を負荷しながら同時にトルク負荷用ギアの回転によりトルクを負荷し得ようになっている。また、両者とも(ひずみ)速度一定の下で試験が可能である。

試験中の引張り荷重およびトルクは上部応力棒に貼付したストレインゲージによりブリッジ回路を構成し、その出力電圧をX—Tレコーダに記録することにより測定した。また、試験中の引張りひずみは、試験片標点間に取り付けた伸び計により、せん断ひずみはトルク負荷用ギアの回転角度から計算により求めた。

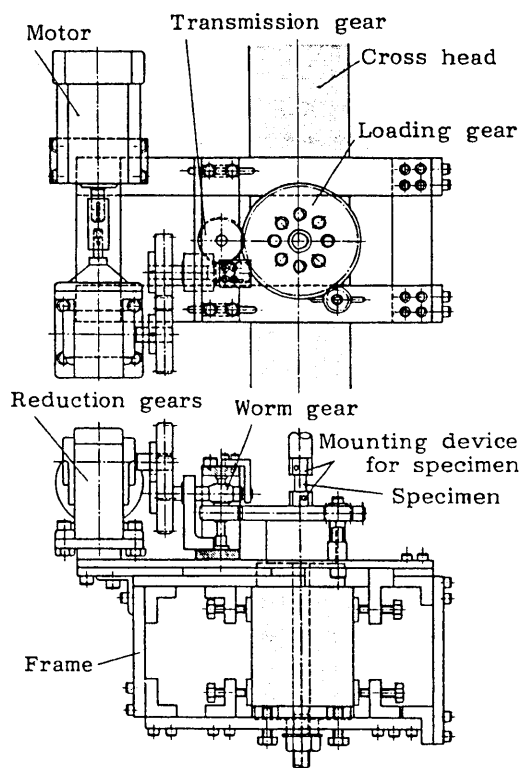


図2 実験装置概略

### 2・3 実験方法

前述のように本実験では、試験片に引張り荷重とねじりトルクを同時に負荷しながら破断させた。その時の負荷経路は、両者の負荷速度が常に一定の割合を保ちながら増加するようなものを採用し、降伏後もそのままに保った。その時、ねじりひずみ速度 $\dot{\gamma}$ と引張りひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の比の正接

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\epsilon}} \quad (\text{deg}) \quad (1)$$

をとり、 $\beta$ をひずみ経路の選定に用いる。つまり、その経路は図3に示すように $\beta=0^\circ$ のとき単軸引張り、 $\beta=90^\circ$ のとき単純ねじりの状態でその中間では組合せ応力状態であることを示す。

本報では材料のじん性を表す尺度として、吸収エネルギーを用い近似的に評価する。単位体積あたりの吸収エネルギー $U$ は応力 $\sigma$ をひずみ $\epsilon$ で積分した値で表される。

$$U = \int_0^{\epsilon_b} \sigma d\epsilon \quad (\epsilon_b: \text{破断ひずみ}) \quad (2)$$

ここでは、引張り応力と引張りひずみによる吸収エネルギーを $U_1$ 、せん断応力とせん断ひずみによるものを $U_2$ 、相当応力と相当ひずみによるものを $\bar{U}$ として表す。

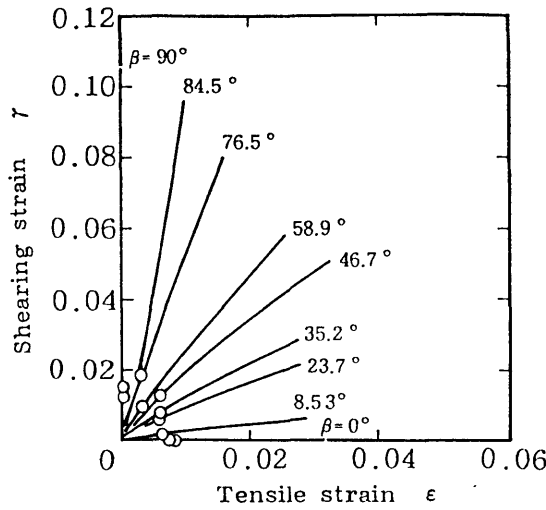


図3 引張りひずみとせん断ひずみの関係

#### 2・4 降伏曲線からの $\bar{r}$ 値算法

従来、金属薄板の異方性降伏関数としては、R.Hillの二次式<sup>2)</sup>が用いられている。これを本研究の引張り—ねじり組合せ応力下に適用すると

$$\frac{2}{3} (F+G+H) \sigma_{eq}^2 = (G+H) \sigma^2 + 2N \tau^2 \quad (3)$$

となる。ここで $F$ 、 $G$ 、 $H$ 、 $N$ は異方性パラメータであり、異方性を考慮しない場合には $3F=3G=3H=N$ とすれば上式は、Von Misesの降伏条件式に一致する。平面応力状態下における異方性パラメータは $r$ 値で表され、それらは圧延方向に対する試験片の採取方向により異なる。

$$\begin{aligned} r_0 &= \frac{H}{G} \\ r_{90} &= \frac{H}{F} \\ r_{45} &= \frac{N}{F+G} - \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

これらを用い板厚異方性の条件( $r_0=r_{90}=r_{45}=\bar{r}$ ) および式(3)の相当応力を単軸引張り応力に相当させることにより、次式が得られる。

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma^2 + \left( 2 + \frac{2\bar{r}}{1+\bar{r}} \right) \tau^2 \quad (5)$$

上式を降伏関数とし、応力—ひずみ増分関係式、塑性仕事増分より相当ひずみ増分を求めると

$$d\bar{\epsilon}^2 = d\epsilon^2 + \frac{d\tau^2}{2 + \frac{2\bar{r}}{1+\bar{r}}} \quad (6)$$

となる。なお、式(5)、(6)で $\bar{r}=1$ とするとVon Misesの降伏条件式と一致する。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 単軸引張り応力下での強度とじん性

中実および中空試験片を単軸引張り応力下で破断させた時の引張り強さ、降伏応力(0.2%耐力)とのかたさの関係を図4に示す。両試験片とも同程度の応力値を示しており、また、かたさの変化による応力値の変化も同様の傾向を示している。降伏応力はHV500からHV630にかけて増加傾向を示しHV630でほぼ最大値1600MPaになり、さらにかたさが増すにつれ緩やかに減少する。また、引張り強さは降伏応力と同様の傾向を示すがHV720でほぼ最大値1800MPaを示している。

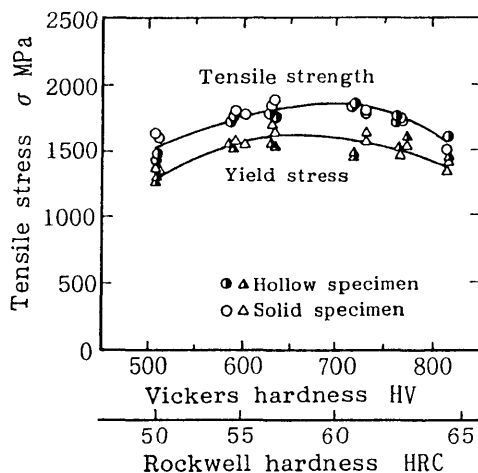


図4 引張り応力とかたさの関係

図5は、図4の結果に対応する引張り吸収エネルギー $U_I$ とかたさの関係を示したものである。工具鋼の吸収エネルギーはかたさの増大に伴い減少するが、特にあるかたさの領域において急激に減少することが報告されている<sup>3)</sup>。実験に使用した試験片材料SKD11の場合には、HV720からHV760の間にそれが確認され、それより低いかたさの領域が延性破壊の領域で、HV760以上がぜい性破壊の領域で

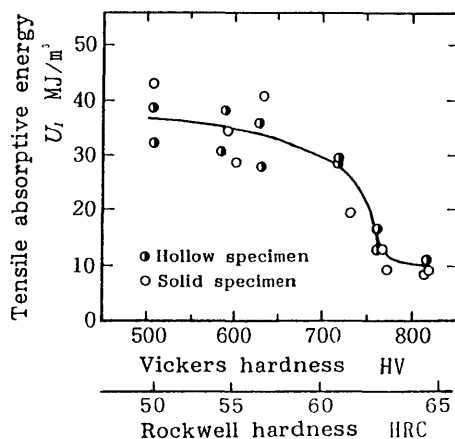


図5 引張り吸収エネルギーとかたさの関係

あることがわかる．また，中実および中空試験片の間には吸収エネルギーに差異がないことも確認された．

図6に走査電子顕微鏡による試験片の破断面の写真の一例を示す．HV720以下の延性破壊の破面には，無数のディンプルが存在し，またクロム炭化物の析出物内にはクラックが確認される．一方，HV760以上のぜい性破壊の破面では，小さなディンプルとともにへき界が見られ結晶粒内で破壊したことがわかる．

したがって，図5の結果をも併せてHV720とHV760の間に破壊様式が移り変わる遷移領域が存在することが明らかである．

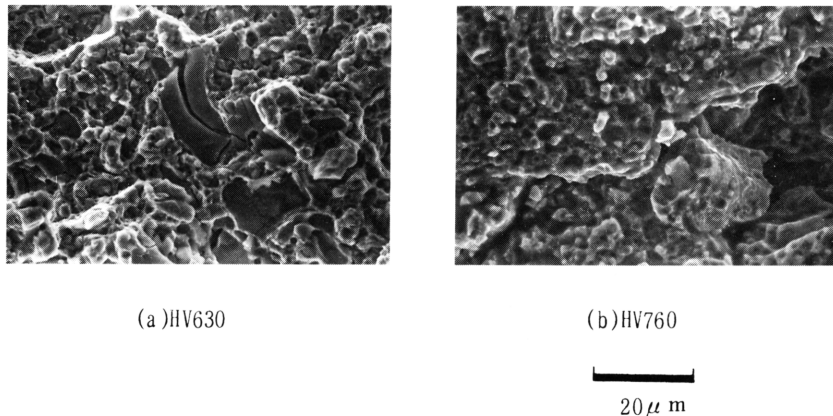


図6 破断面の電子顕微鏡写真

### 3・2 組合せ応力下での降伏曲面と $\bar{\tau}$ 値の関係

図7は降伏応力を( $\sigma, \sqrt{3}\tau$ )平面上に示したものである．図中の各かたさに対する降伏曲線（実線，破線，鎖線）は2・4式(5)に基づき実験値に最も近似するように描いたものである．HV500，HV630は降伏点がほぼ円形に点在し，Von Misesの降伏条件に近いものであると言える．また，HV500の降伏曲線が他のかたさのそれよりかなり小さいことがわかる．しかし，HV720では，降伏曲線は円形にはならず， $\sqrt{3}\tau$ 軸を長径とした楕円となる．そして，HV760ではその傾向がますます高まり，ねじり降伏応力は最大値を示す．引張り降伏応力がHV630と同程度であることからHV720，HV760はせん断に対し優れた強度を持つことがわかる．

以上の結果を2・4に示した $\bar{\tau}$ 値をもとに考察する．図8に前述の降伏曲線より求めた $\bar{\tau}$ 値とかたさの関係を示す．HV500からHV630にかけては $\bar{\tau}=1.1\sim 1.2$ であり，実験を行ったかたさではHV630で Von Misesの降伏条件に最も近づくことがわかる．しかし，HV720以上では $\bar{\tau}$ 値が1.0より小さくなり，かたさが増すにつれその傾向が強い．このことから，かたさの大きい領域では，薄板における板厚方向の変形が板幅方向のそれに比べ大きいため，強度に乏しい板厚方向の負担が大きく，ぜい性破壊を起こすものと考えられる．

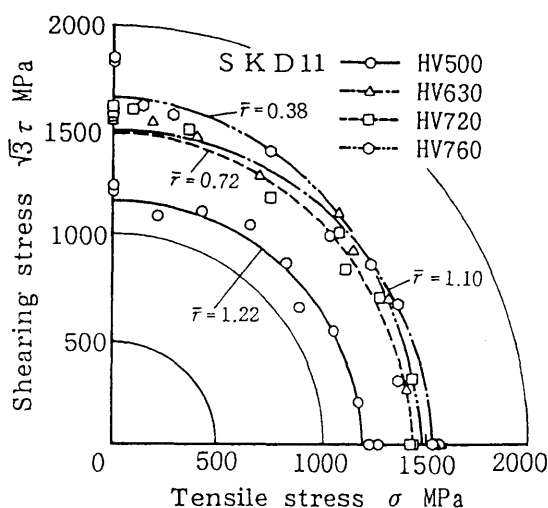


図7 降伏時の引張り応力とねじり応力の関係

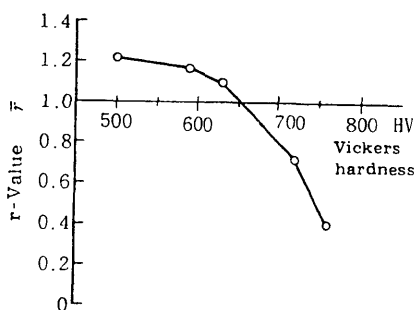


図8  $\bar{r}$ 値とかなさの関係

### 3・3 相当応力と相当ひずみの関係

図9に相当応力—相当ひずみ関係を示す。図9(a)は $\bar{r} = 1$ の場合である。斜線の部分は応力—ひずみ曲線の集まりを示し、プロットは各試験片の破断点である。どのかなさでも弾性域は同一の軌跡を描き、破断ひずみは $\beta$ が大きくなるにつれ増大している。HV630以下では、破断時の相当応力がほぼ一定であるのに対し、HV720以上では $\beta$ の増大にともない相当応力も大きくなっている。また、flow curveの集まりの範囲も広がっており、特に、HV760でその傾向が強い。さらにflow curveの曲率からHV720以上ではひずみ硬化が大きいこともわかり、また、HV760の引張り応力が支配的な場合では、破断点が1.0～1.5%程度のひずみの箇所に集まっていることから、ぜい性破壊を起こしていることがわかる。

図9(b)は3・2に示した $\bar{r}$ 値を使って相当応力—相当ひずみ線図を描いたものである。これによると、Von Misesの降伏条件に比較的近いHV630以下では図9(a)の場合とあまり差はないが、HV720以上ではflow curveの開きが小さくなってきていることがわかる。

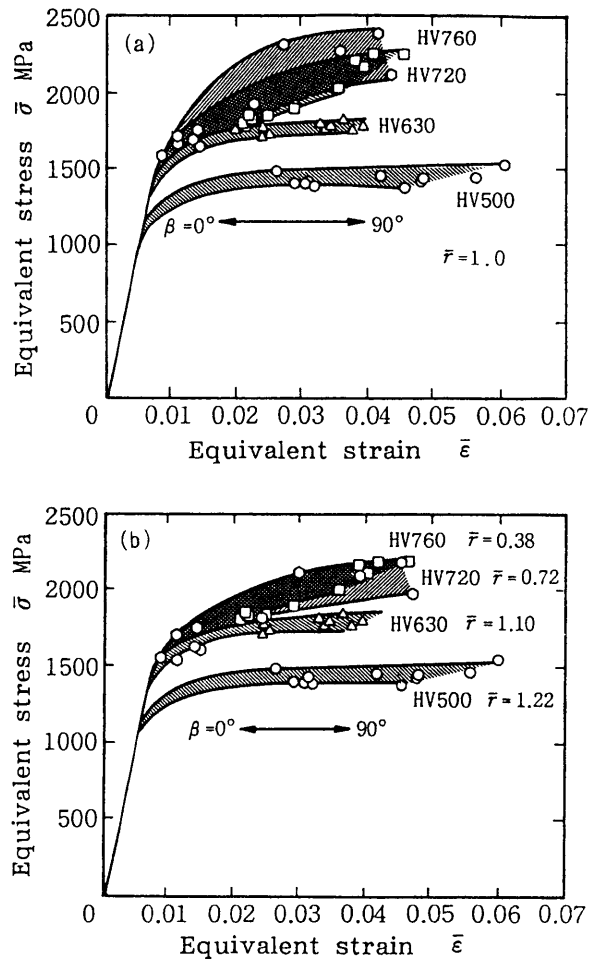


図9 相当応力と相当ひずみの関係

### 3・4 吸収エネルギーによるじん性評価

相当応力と相当ひずみから求めた吸収エネルギー $\bar{U}$ と $\beta$ の関係を図10に示す。全体的にHV500が高じん性を示しており、かたさの増大とともにじん性は低下する。どのかたさにおいても $\bar{U}$ は $\beta$ の増大に伴い大きくなっており、これはねじりが支配的な場合に対しSKD11が高じん性を示すということである。特に、HV760以上では $\beta$ が小さい部分で他のかたさの場合に比べじん性が劣るが、 $\beta$ が大きくなるとHV630以下と同等のじん性を示す。以上の結果からSKD11はかたさの増大に伴い引張りが支配的な場合のじん性は低下するが、ねじりが支配的な場合のじん性は低下しないことがわかった。

### 3・5 まとめと検討

最後に、SKD11を実際に塑性加工用工具鋼として組合せ応力下に適用する場合の使用かたさについて、これまでの結果をもとに考察する。まず、強度についてはHV630が最も高く続いてHV720であるが、HV720からHV760にかけてねじりに対する強度の増加が見られるため、ねじりが支配的な場合には、HV720以上にすることが望ましい。また、じん性については引張りが支配的な場合、HV760ではじん性不足であるので、 $\beta$ の値にかかわらず比較的安定したじん性を示すHV630からHV720が望ましい。



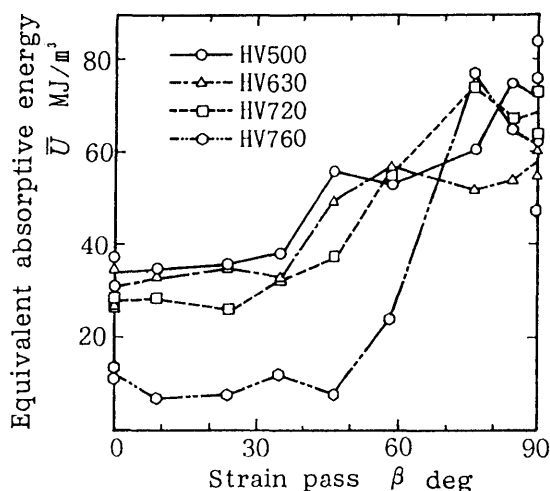


図10 吸収エネルギーとひずみ経路の関係

#### 4. 結 言

熱処理条件の異なる冷間加工用合金工具鋼SKD11に引張り－ねじり組合せ応力を負荷した際の強度とじん性を評価し以下の結果を得た。

- (1) 吸収エネルギーとたたさの関係から破壊様式が延性からぜい性へと遷移する領域はHV720からHV760の間に認められた。
- (2) HV630以下ではVon Misesの降伏条件にはほぼ一致するが、HV720以上では同降伏条件に一致せず整理できない。このような場合に対して板厚異方性を考慮したHillの降伏条件式を適用し、整理することが可能であり、実験により求めた $r$ 値はHV720以上で0.4～0.7という結果が得られた。
- (3) たたさの増大とともに、引張りのじん性は大幅に低下するが、ねじりのじん性はあまり低下しない。
- (4) 組合せ応力下でのSKD11の使用たたさを考える場合、引張りが支配的な場合にはHV630からHV720、ねじりが支配的な場合にはHV720程度のかたさを使用することが望ましい。

一般にぜい性材料の $r$ 値はその性質から実験的に測定が困難であるが、本報で示したような降伏曲面を用いた $r$ 値の算出法は一つの有効な手法であると考えられる。今後、実験的に検討していく予定である。

最後に本研究の遂行に当たり有益な御助言をいただいた、京都工芸繊維大学 山口克彦教授、並びに研究に協力いただいたエィ・ダブリュ工業(株) 田中克典君、(株)松浦機械製作所 藤田 将君、大学院機械工学専攻 松井一彦君に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 吾郷：塑性と加工, 19-204(1978), 44.
- 2) R. Hill：塑性学, (1954), 313. 培風館
- 3) 後藤ほか：福井大工研報告, 38-1(1990), 1.

